

補助事業番号 2017M-134

補助事業名 平成29年度 クロスモーダルな知覚車輪を統合した極限探査ロボットの開発
補助事業

補助事業者名 東北大学大学院工学研究科 永岡健司

1 研究の概要

本研究では、噴火した火山や月、火星などの極限環境を探査する遠隔操作型の車輪移動ロボットに向けた基盤技術として、地盤との力学的相互作用をクロスモーダルに知覚する車輪（知覚車輪）の開発と、それらを統合した極限探査ロボットシステムのフィールド実証試験を目的としている。これは、車輪単体での走行状態（砂への沈下量、滑り量、砂反力）をオンラインで知覚することが可能な技術である。また、単輪走行試験を通じて得られた知覚情報と走行力学との相関モデルを構築し、これによりロバストな運動状態推定が可能であることを実験的に示した。また、知覚車輪を統合した4輪型の極限探査ロボットシステムを設計・開発し、砂浜や粘土質地形での屋外フィールド実験を通じて、構築したシステムによる走行状態の知覚が可能であることを定量的に示すとともに、本技術の有効性を実証した。

2 研究の目的と背景

近年多発する火山噴火の際の情報収集や、月や火星での科学探査など、人が直接立ち入ることができない極限環境では、遠隔操作によるロボット探査が重要な役割を果たす。このような極限探査では、緩い土砂や砂利で覆われた地形で車輪型ロボットが走行不能に陥ることが技術課題であった。その理由として、遠隔操作者がロボットの走行状態（スリップや沈下量）を定量的に判断することが難しい点が挙げられる。そのため、車輪と地盤との力学的相互作用をロボット自身が知覚し、その情報に基づいた適応的な自律走行制御を実現することが求められている。

一方で、人は歩行の際、足裏での触圧覚から、地面の滑り易さや変形などの状態を知覚し、さらには視覚や聴覚などのマルチモーダルな知覚情報と組み合わせることで環境適応性を発揮する。これは主に視覚情報に頼って移動する従来の車輪ロボットとの決定的な違いであり、遠隔操作型極限探査ロボットの移動性能を向上させるブレイクスルー技術となる。このような考えの元、本研究グループでは、これまでにクロスモーダルに走行状態を知覚する知覚車輪の開発に関する基礎研究を実施してきた。

そこで本研究では、車輪に作用する地盤反力や、沈下量、スリップを知覚し、加えて移動距離を推定することで自律制御を実現する知覚車輪モジュールを開発し、さらにそれらを統合した4輪型の極限探査ロボットシステムを開発し、屋外フィールドでの走行制御実験による技術実証を行うことを目指す。

3 研究内容

(1) 知覚車輪による単輪走行試験と相関モデルの構築

図1に示す知覚車輪に対して走行状態（沈下量、滑り、砂反力）を知覚可能な走行試験装置（図2）を改良開発した。また、知覚情報と相互力学との相関を解析するために、画像処理技術PIV（Particle Image Velocimetry）を用いた砂の流動を計測するための仕様変更を行った。特に、本研究において、図3に示すグラウサ車輪が軟弱砂地を走行する際の砂の流動を可視化し、地盤との相互力学を説明する力学的根拠を獲得した。

また、単輪走行試験を通じて得られた知覚情報と走行特性との関係を知覚相関モデルとして体系的に整理し、運動制御ための基盤技術を構築した。



図1：知覚車輪ユニット



図2：単輪走行試験装置

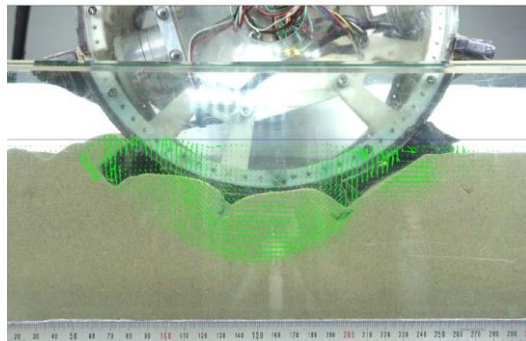


図3：PIVを用いたグラウサ車輪下部の砂の流動解析

(2) 知覚車輪を統合した極限探査ロボットの開発とフィールド試験

開発したクロスモーダルな知覚車輪の実践的応用として、知覚車輪を統合した4輪型の極限探査ロボットシステムを設計・開発した。図4に開発したロボットの外観を示す。ロボットに搭載の車輪にはそれぞれ知覚機能が搭載されており、独立して走行状態をオンラインセンシング可能な構成となっている。

本ロボットを用いて、構築した状態推定システムの性能評価を行うため、複数の屋外フィールドで走行実験を実施した。図5に屋外フィールドを示す。本研究では、アスファルト、乾燥砂地、粘土質地形、砂利、粘土質斜面のそれぞれに対して、性能を評価した。また、乾燥砂地においては、屋内の砂場にて斜面を形成することで、高精度な性能評価を行った。

屋外フィールド実験の結果の一例を図6、7に示す。図6は様々な屋外フィールドにおける車体の移動速度について、知覚車輪による推定値と外部計測機器に基づく真値とを比較した結果である。この結果から、構築した推定システムは地形環境の変化に対してもロバストかつ高精度に速度推定が可能であることを示している。これはつまり、車輪の滑りが精度よく推定できることと等価である。次に、図7は屋内外の砂地、粘土質地形の異なる傾斜角度に対する、砂反力（ここでは、車輪駆動トルク）の計測値に基づいて相関モデルを走行抵抗係数として推定した結果を示している。この結果から考察できる点として、傾斜角度の増加に従って走行抵抗係数が増加する大きな傾向が見て取れる。それと同時に、重要な結果として、走行不能な状態（完全に車輪が滑って進まない状態）における走行抵抗係数は、砂と粘土質地形という異なる地質に対して統一的な値を（ここでは、1.4程度）を示すことが分かった。

以上により、知覚相関モデルを用いて知覚車輪のセンシング情報を統合することにより、車輪型移動ロボットの走行状態を冗長的（あるいは相補的に）にセンシングすることが可能なシステムを実現した。

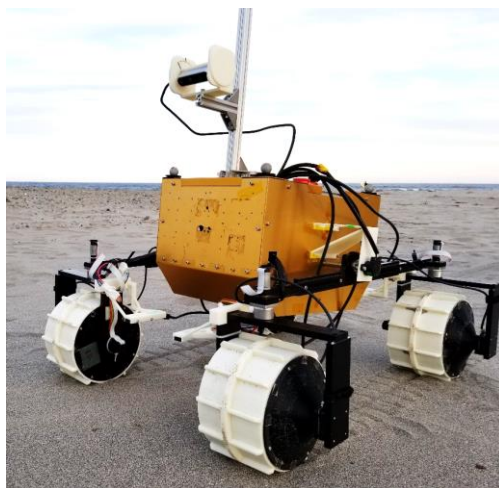


図4: 知覚車輪を統合した極限探査ロボット

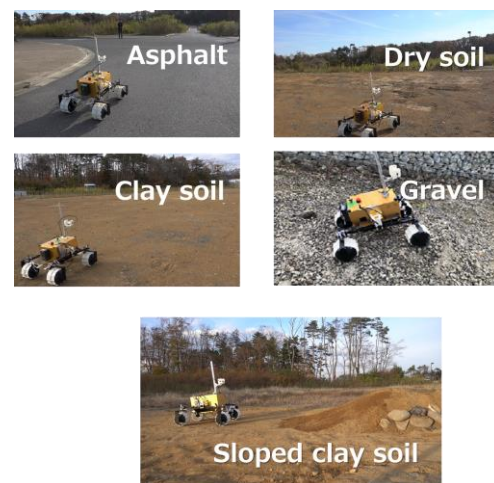


図5: 屋外フィールド

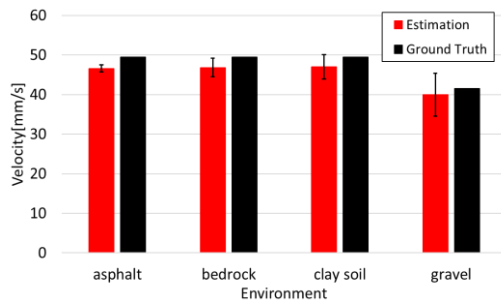


図6: 車体速度推定の結果

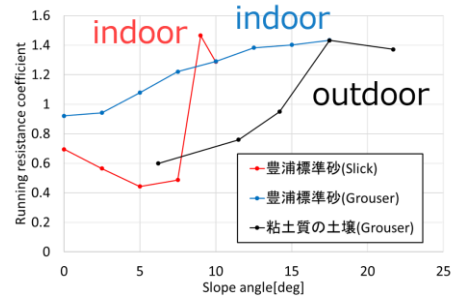


図7: 斜度と走行抵抗係数との関係

4 本研究が実社会にどう活かされるかー展望

本研究で開発する、知覚車輪を統合した極限探査ロボットシステムは、従来の車輪型ロボットに対しても移植性の高い要素技術であり、既存ロボット探査への適用も見据えた汎用性を担保した基盤技術である。また、知覚車輪の機能をモジュール化することにより、可視光カメラや赤外線レーザ測距センサなどのロボットに広く用いられている広域環境センシング機能とも共存させることができ、局所的な知覚情報を生かして、地盤環境への適応性を発揮し、かつ広域を自律移動制御可能な統合システムへの発展が期待できる。特に、本研究で実証した極限探査ロボットシステムは、実践的応用を踏まえたアプリケーション例を示すものであり、自然に対峙する様々な屋外フィールドロボットへ拡張していくことが期待される。

5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

近年直面する大規模自然災害（火山の噴火や、土砂崩れ、水害など）、および宇宙探査への民間の参入を受けて、人が立ち入ることのできない自然の極限環境下で人に代わって作業を行う遠隔操作型のロボット技術に対する需要と期待が高まってきている。特に、申請者はこれまで宇宙ロボティクスを専門として研究に従事する中で、より実践に即した応用研究にも力を入れてきた。特に、本研究で開発した知覚車輪は計測技術と力学的相互作用（理論）を融合した研究開発である。その中で、複雑な砂の振る舞いを扱う上で、これまでに培ってきた車輪と地盤との相互力学に関する知識と経験に基づき、砂の流動解析を組み合わせた力学解析を実施することで、力学的相互作用を生み出す根拠を説明するための証拠を提示することができた。これは、理論研究と応用研究を繋ぐ成果であるといえ、車輪走行力学という観点でも重要な成果であると考えられる。

6 本研究にかかわる知財・発表論文等

遠藤翔吾, 遠藤正文, 永岡健司, 吉田和哉: 月惑星探査のためのToFカメラとトルクセンサーを用いた走行状態推定手法, ロボティクス・メカトロニクス講演会2019講演論文集, 2019.

- K. Nagaoka, K. Sawada, K. Yoshida: Shape effects of wheel grousers on traction performance on sandy terrain, *Proceedings of the 10th Asia-Pacific Conference of ISTVS*, 2018.
- Y. Yamano, K. Nagaoka, K. Yoshida: PIV analysis of soil deformation beneath a grouser wheel, *Proceedings of the 10th Asia-Pacific Conference of ISTVS*, 2018.
- S. Higa, K. Nagaoka, K. Yoshida: Reaction force/torque sensing wheel system for in-situ monitoring on loose soil, *Proceedings of the 19th International & 14th European-African Regional Conference of the ISTVS*, 2017.

7 補助事業に係る成果物

(1) 補助事業により作成したもの

特になし

(2) (1)以外で当事業において作成したもの

特になし

8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名：九州工業大学(補助事業実施期間:東北大学)

(キュウシュウコウギョウダイガク)

住 所：〒802-8550

福岡県北九州市戸畑区仙水町1-1

担 当 者：准教授 永岡健司(ナガオカケンジ)

担 当 部 署：大学院工学研究院(ダイガクインコウガクケンキュウイン)

E - m a i l : nagaopka.kenji572@mail.kyutech.jp

U R L : <http://www.mech.kyutech.ac.jp/tribo/nagaoka/index.html>